



ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura

Vol. 191-775, septiembre-octubre 2015, a267 | ISSN-L: 0210-1963

doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5006>

HISTORIA DE LAS CONCEPCIONES CIENTÍFICAS SOBRE LA LUZ / *HISTORY OF SCIENTIFIC IDEAS ABOUT LIGHT*

LA LUZ DEL ORIGEN DEL UNIVERSO

THE LIGHT OF THE UNIVERSE'S ORIGINS

Alberto CasasConsejo Superior de Investigaciones Científicas
alberto.casas@uam.es

Cómo citar este artículo/Citation: Casas, A. (2015). "La luz del origen del Universo". *Arbor*, 191 (775): a267. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5006>

Copyright: © 2015 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0.

Recibido: 11 diciembre 2014. Aceptado: 6 marzo 2015.

RESUMEN: En 1965 se descubrió el fondo de radiación de microondas, un eco luminoso de la Gran Explosión (Big Bang). La cantidad de información contenida en esta reliquia del universo primitivo es verdaderamente extraordinaria. En la actualidad los datos más precisos sobre el origen y estructura del universo provienen del estudio de esta luz primigenia, que aún no ha sido explorada en todo su potencial.

PALABRAS CLAVE: Radiación de fondo; universo primitivo; Big Bang; fluctuaciones en la radiación de fondo; materia oscura; energía oscura.

ABSTRACT: Penzias and Wilson discovered the cosmic microwave background, a luminous echo of the Big Bang, in 1965. The amount of information encoded in this relic of the early universe is truly extraordinary. At present, the most precise data about the origin and structure of the universe comes from the study of this primordial light, the full potential of which has yet to be explored.

KEYWORDS: Cosmic microwave background; early universe; Big Bang; fluctuations in the CMB; dark matter; dark energy.

En memoria de mi padre, Justiniano Casas, pionero del estudio de la luz en España, en el 100 aniversario de su nacimiento.

La observación del universo a lo largo de los siglos no nos ha proporcionado ninguna pista especial acerca de la naturaleza de la luz. Sin embargo, sí es cierto lo contrario: el estudio de la luz que nos viene del exterior de la Tierra nos ha proporcionado una enorme cantidad de información sobre el universo: sobre su origen, su densidad, su composición, su estado dinámico y su forma. Se puede decir que prácticamente todo lo que sabemos sobre el universo, lo sabemos gracias a la luz que recibimos de él.

Posiblemente la fuente de información más rica y precisa acerca del origen del universo es el fondo de radiación de microondas, habitualmente llamado CMB (acrónimo inglés de Cosmic Microwave Radiation). Precisamente en 2015 se cumple el 50 aniversario de la publicación, por Penzias y Wilson, de la primera observación de este fondo de radiación, un auténtico hito en nuestro conocimiento básico (Penzias y Wilson, 1965).

En este artículo nos centraremos en el origen de esta radiación de fondo y en la información, extraordinariamente rica, que contiene sobre el universo.

1. EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS

En 1964 dos jóvenes radioastrónomos, A. Penzias y R. Wilson, estaban tratando de reutilizar una antena de la compañía Bell Telephone (construida para comunicaciones por satélite) para detectar ondas de radio emitidas por nuestra galaxia. Penzias y Wilson, de forma concienzuda, se dedicaron primero a identificar todo el “ruido” e interferencias producidos por el propio sistema electrónico, y por ondas de radio en la atmósfera de la Tierra. La idea era “descontar” todo ese ruido indeseable para quedarse solo con la señal galáctica. Pero esta tarea preliminar resultó más difícil de lo previsto. Había un “ruido parásito” en la antena: una extraña radiación de microondas cuyo origen no conseguían identificar. Esta misteriosa radiación tenía propiedades sorprendentes: no cambiaba con la hora del día ni la estación del año. Tampoco dependía de la orientación: por todas las direcciones llegaba exactamente la misma enigmática señal. Sin saberlo, Penzias y Wilson acababan de realizar un descubrimiento crucial para entender el origen del universo, motivo por el que recibieron el premio Nobel en 1978. Pero en un principio no comprendieron su importancia. En 1965,

gracias a la labor intermediaria de destacados físicos, los resultados de Penzias y Wilson fueron interpretados a la luz de avances teóricos en cosmología, y su importancia capital pudo ser reconocida. Esa misteriosa radiación parásita resultó ser un “eco luminoso” de la Gran Explosión. Veamos cómo se originó.

2. LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL BIG BANG

Curiosamente en 2015 se cumplen 100 años de otro acontecimiento científico extraordinario: la formulación por Albert Einstein de la teoría de la Relatividad General (Einstein, 1915), uno de los pilares indiscutibles de la física moderna. Una de las consecuencias más impresionantes de la teoría es que el universo ha de atravesar necesariamente por una fase de expansión, como la que realmente vemos (las galaxias se separan unas de otras). La teoría predice que todo el universo observable debió estar una vez concentrado en el mismo sitio, instante que corresponde a la Gran Explosión, el famoso Big Bang. ¿Cuándo se produjo el Big Bang? Esto puede determinarse conociendo el ritmo de expansión actual. Retrocediendo mentalmente en el tiempo nos podemos imaginar un universo más y más denso (las galaxias cada vez más cerca unas de otras), hasta que hace unos 13.800 millones de años toda la materia y energía estaba concentrada en un mismo sitio. Ese fue el momento del Big Bang. Pero ¿qué razones tenemos para creer que esto sucedió realmente así? De hecho el propio Einstein no creía que esto fuera posible, ya que en aquella época las observaciones astronómicas parecían indicar un universo estático y no en expansión. Incluso modificó la ecuación principal de su Teoría de la Relatividad para permitir la posibilidad de un universo estático, modificación de la que luego se arrepintió. Fueron otros físicos, como el ruso Alexander Friedmann y el belga Georges Lemaître, los que tuvieron más fe que el propio Einstein en su ecuación original y predijeron con todo detalle que el universo debía atravesar una fase de expansión (Friedmann, 1922; Lemaître, 1927), y haber surgido a partir de una gran explosión, posteriormente denominada Big Bang.

La idea de una gran explosión inicial de la que surgió todo es tan extraordinaria que uno se pregunta inmediatamente qué pruebas tenemos de ella. ¿No podría ser todo una elucubración de los físicos? Antes de responder a esta pregunta, conviene recalcar que la teoría del Big Bang no es solamente una descripción cualitativa del comienzo del universo, sino una teoría *cuantitativa*, que nos ofrece una película detallada de la evolución del universo desde sus primeros

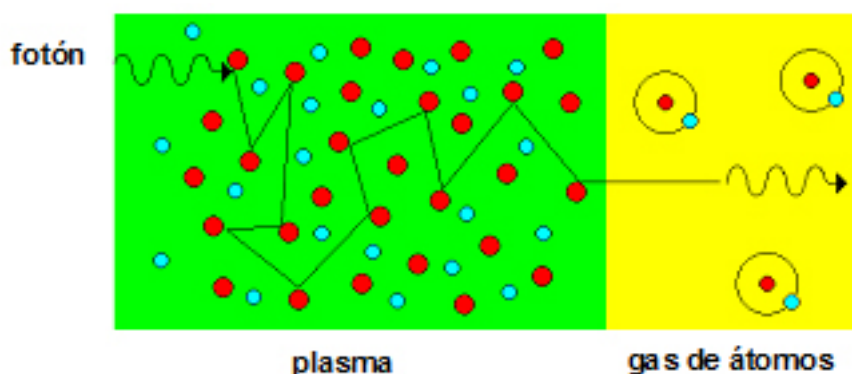
instantes. Y una de las consecuencias más importantes de la teoría es que el universo primitivo estaba muy caliente. Esto no es sorprendente: todos sabemos que cuando la materia se comprime se calienta. Alguna vez habrán observado, hinchando la rueda de una bicicleta, que al comprimir el aire con el émbolo de la bomba de inflar, esta se calienta. Análogamente, el universo primitivo estaba más concentrado, y por tanto más caliente. La teoría nos dice con precisión cuál era la temperatura a la que se encontraba en cada momento. Además, a la materia, cuando se calienta, le suceden cosas. Todos sabemos que al calentar agua a 100° C, hierve y se transforma en vapor. Análogamente, a la materia de aquel universo primitivo le sucedieron cosas importantes en distintos instantes. Esto enlaza con nuestra pregunta anterior: ¿Qué pruebas tenemos de que todo esto pasara realmente así? Ciertamente, no podemos regresar atrás en el tiempo para contemplar qué sucedió, ni podemos fabricar un nuevo Big Bang para estudiarlo. Los físicos proceden aquí de forma semejante a los geólogos. Un geólogo puede llegar a la conclusión teórica de que lo que ahora es un desierto, hace cien millones de años era un lago. No puede regresar en el tiempo para comprobarlo. Pero si excavando a la profundidad adecuada encuentra fósiles de peces, habrá obtenido un respaldo importante a su teoría. De forma similar, podemos buscar en el universo actual “fósiles” o reliquias de aquellos instantes iniciales. Concretamente, si la teoría es cierta, debió suceder un acontecimiento trascendental que dejó huellas todavía visibles. Ese acontecimiento es la Recombinación.

Recordemos que un átomo está formado por un núcleo atómico de carga positiva (formado a su vez por protones y neutrones) y una corteza formada por elec-

trones, de carga negativa. El universo primitivo estaba tan caliente que los electrones estaban desgajados de los núcleos. Conviene aclarar aquí que la mayor parte de esos núcleos eran simplemente protones (núcleos de hidrógeno), si bien había una cantidad importante de núcleos de helio y pequeñas trazas de otros núcleos ligeros, que se habían formado en los primeros minutos del universo (los núcleos más pesados se formaron posteriormente en las estrellas). Además había gran cantidad de fotones (partículas de luz) y otras partículas. Este tipo de materia, formado por partículas cargadas interaccionando con fotones es lo que se denomina *plasma*. Las estrellas actuales, como el Sol, también están hechas de un plasma semejante al que llenaba aquel universo primitivo. En un plasma así, los fotones no podían recorrer mucha distancia sin ser interrumpidos por las partículas cargadas (núcleos atómicos y electrones). Esto se debe a que la luz no es otra cosa que radiación electromagnética, que interacciona fuertemente con las partículas cargadas eléctricamente. Esta idea está simbólicamente representada en la parte izquierda de la figura 1, donde vemos la trayectoria zigzagueante de un fotón.

Se trataba por tanto de un universo “traslúcido”, como si una luminosa niebla lo llenara todo (nuevamente como en el interior de una estrella). Sin embargo, a medida que el universo siguió expandiéndose, fue enfriándose progresivamente. Según la teoría, cuando el universo tenía unos 380.000 años, la temperatura había descendido a unos 3.000° C. A esa temperatura, los electrones ya eran lo suficientemente lentos para poder ser capturados por los núcleos, dando lugar por vez primera a átomos neutros. Aquel acontecimiento trascendental suele denominarse *Recombinación*, aunque hubiera sido más correcto lla-

Figura 1



marle “Combinación”, ya que los electrones no habían estado nunca antes ligados a los núcleos. Fue el nacimiento de los átomos.

A partir de ese instante ya no había partículas cargadas por separado sino átomos *neutros*. Por ello, los fotones pudieron por fin viajar libremente en línea recta en todas las direcciones sin interrupciones, y lo han seguido haciendo hasta nuestros días. Esto está representado en la parte derecha de la figura anterior. Aquellos fotones liberados en la Recombinación constituyen hoy la llamada la *Radiación de Fondo* o *Fondo Cósmico de Microondas*, que es lo que fue detectado por Penzias y Wilson en 1964-65 (y desde entonces en numerosísimos experimentos de precisión creciente). Un error común cuando se piensa en la radiación de fondo es creer que es un “fogonazo” que proviene del lugar donde ocurrió el Big Bang. En esa creencia hay dos errores importantes. Primero, el Big Bang no ocurrió en ningún lugar concreto del universo. Según la Teoría de la Relatividad, cuando el universo se expande, es el propio espacio el que se estira como un trozo de goma, por lo que las galaxias situadas en él se separan unas de otras. Una buena imagen en dos dimensiones es las de un globo que se hincha, con las galaxias dibujadas en su superficie. Si echamos marcha atrás en el tiempo, las galaxias aparecen cada vez más juntas, hasta que el globo está totalmente retraído. En ese momento (“Big Bang”), no solo las galaxias (toda la materia) están juntas, sino que el propio espacio está reducido a “un punto”. De la misma forma todo nuestro espacio observable estaba reducido a un punto, por lo que puede decirse que el Big Bang sucedió en todos los puntos a la vez, solo que en aquella época estaban todos reunidos. El segundo error es creer que la radiación de fondo se produjo en el mismo instante del Big Bang. Realmente se produjo 380 000 años después, como acabamos de decir. Entonces el universo ya era grande. De repente el universo se hizo transparente y apareció lleno de luz, luz que se propagaba en todas las direcciones. Por tanto los fotones de la radiación de fondo nos llegan hoy en día desde todas las direcciones.

¿Les ha pasado algo a aquellos fotones durante estos 13.800 millones de años? Solo una cosa im-

portante: se han vuelto más fríos, es decir menos energéticos. ¿Por qué? Recordemos que el universo se expande. Según la Teoría de la Relatividad, esta expansión hay que interpretarla como un estiramiento del espacio. Por otro lado, la luz son ondas electromagnéticas, semejantes a las ondas de un estanque, solo que en ellas lo que oscila no es el nivel del agua, sino campos eléctricos y magnéticos. En la figura 2, la onda de la izquierda representa un fotón (onda electromagnética elemental), inmediatamente después de la Recombinación. La distancia entre dos “crestas” de la onda es lo que llama *longitud de onda*

La parte derecha de la figura 2 representa la misma onda en nuestros días, unos 13.800 millones de años después. El espacio se ha estirado, y por tanto la longitud de onda lo ha hecho en la misma proporción. Lo que antes era una radiación luminosa visible (con longitud de onda pequeña) se ha convertido en una radiación de microondas (con longitud de onda mucho mayor). Concretamente, la longitud de onda es ahora unas mil veces más larga. Sucede que los fotones asociados a longitudes de onda más largas son menos energéticos (un resultado de la Mecánica Cuántica). Así que los fotones de la radiación de fondo actual son muy débiles, y en vez de corresponder a una temperatura de 3.000° C (como cuando fueron liberados), corresponden a una temperatura de 270° C *bajo cero*. El cero absoluto de temperaturas es 273 °C *bajo cero*, por lo que la temperatura *absoluta* de la radiación de fondo es aproximadamente de tres grados, o más exactamente 2,726 K (K denota grados “Kelvin”, es decir absolutos). Este número da una idea de la precisión con que se ha conseguido medir esta “temperatura cósmica”.

La radiación de fondo actual es por tanto una reliquia del pasado, que nos da un testimonio impresionante de lo sucedido cuando el universo tenía 380.000 años. Las cosas transcurrieron como predice la teoría del Big Bang. Conviene pensar que la radiación de fondo no es algo que está solo en el espacio exterior. Realmente está en todas partes. Ahora mismo usted está siendo alcanzado por millones de aquellos fotones primitivos. Y esta es la razón por la que Penzias y Wilson la detectaron inicialmente con una antena en la superficie

Figura 2



terrestre. Desde aquel descubrimiento, la Radiación de Fondo ha sido estudiada en profundidad, tanto en experimentos en la superficie terrestre como en instalados en sondas espaciales o en globos estratosféricos. Estos estudios han seguido dando importantísimas “satisfacciones” a la teoría. Por ejemplo, la teoría predice que el espectro de esta radiación (es decir, la distribución de energía radiante en cada longitud de onda) ha de ser de una forma determinada. Técnicamente, el espectro ha de corresponder a lo que se llama espectro de cuerpo negro perfecto. Y eso es precisamente lo que se mide. De hecho, la Radiación de Fondo supone el ejemplo más perfecto de cuerpo negro que se conoce. Cualquier teoría del universo que quiera competir con el Big Bang debería poder explicar este hecho extraordinario, y de hecho ninguna lo ha conseguido.

3. FLUCTUACIONES EN LA RADIACIÓN DE FONDO

En el año 1969 se descubrió que la radiación de fondo no era perfectamente isotrópica (igual en todas las direcciones). Mostraba una dirección “privilegiada” desde la que nos llegan fotones ligeramente desplazados hacia el rojo (menos energéticos), mientras que en la dirección opuesta nos llegan ligeramente desplazados al azul (más energéticos). Este hecho es simplemente consecuencia de que nuestra galaxia, la Vía Láctea, se mueve con una velocidad peculiar respecto al fondo de microondas. Los fotones que nos llegan “por detrás” los percibimos menos energéticos (su frecuencia se desplaza al rojo) y los que nos llegan “de frente” los vemos más energéticos (su frecuencia se desplaza hacia el azul). Precisamente gracias a esta anisotropía de la radiación de fondo (técnicamente, una anisotropía de tipo dipolo) sabemos que, con respecto al fondo de radiación, nos estamos desplazando a 380 km/s, en dirección hacia la constelación de Virgo. Una vez que esta anisotropía, debida a nuestro movimiento peculiar, fue “extraída” de los datos, la radiación de fondo parecía absolutamente homogénea: miráramos hacia donde miráramos la temperatura era la misma, o sea los fotones nos llegaban “igual de calientes” en todas las direcciones. Y esto es lo que se observó durante muchos años.

Sin embargo, los físicos sospechaban que eso no podía ser así. Sabemos que el universo no es totalmente homogéneo, pues la materia aparece agrupada en galaxias y cúmulos de galaxias. Si en su origen el universo hubiera sido exactamente homogéneo, estas agrupaciones no se habrían producido, o lo habrían hecho en grado mucho menor. Por fin, en 1992 los datos del satélite COBE (Smoot *et al.*, 1992) pusieron de manifiesto las esperadas inhomogeneidades de la

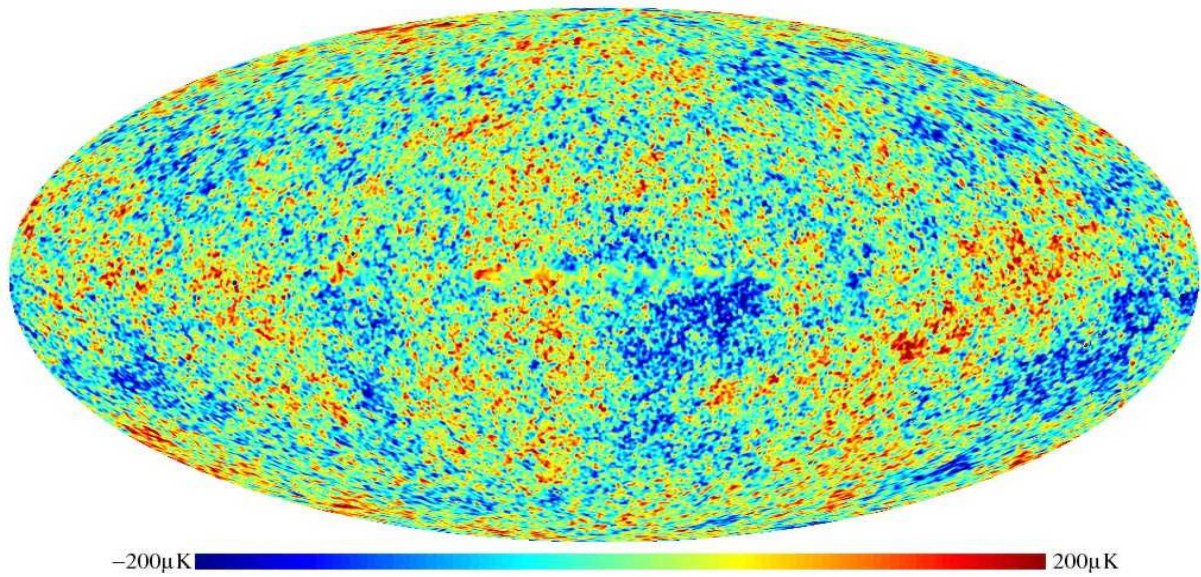
radiación de fondo (los investigadores principales de la colaboración, George Smoot y John Mather, recibieron por ello el Premio Nobel en 2006). Esas inhomogeneidades o fluctuaciones de la temperatura de un punto a otro son extraordinariamente tenues: del orden de unas diezmilésimas de grado, que es precisamente lo que se esperaba.

Posteriormente, el satélite norteamericano WMAP (a partir de 2003) y, más recientemente, el europeo PLANCK (a partir de 2010) han sido capaces de cartografiar con extraordinaria precisión las inhomogeneidades de la temperatura de la radiación de fondo. El resultado es el mapa del cielo de la figura 3 (Ade, Agamin, Alves *et al.*, 2014). Esta imagen se ha hecho famosa (con razón) y es habitual encontrársela en miles de publicaciones y páginas web. Es importante entender bien su significado. Cada punto del mapa corresponde a una dirección por la que, procedentes del cielo lejano, nos llegan a la Tierra fotones de la radiación de fondo. Los colores representan la temperatura asociada a esos fotones (azul, frío; rojo, caliente). Repetimos que, en realidad, las variaciones de temperatura de un punto a otro del mapa son solo de diezmilésimas de grado.

Notemos que los fotones de la Radiación de Fondo que alcanzan la Tierra *justo ahora*, partieron (hace 13.800 millones de años) desde una imaginaria superficie esférica muy lejana, en cuyo centro estamos nosotros; tal como ilustra la figura 4.

Debido a la expansión cósmica, mientras la luz ha viajado desde esa esfera hasta nosotros, el universo ha seguido expandiéndose. Por ello, la distancia actual entre esa esfera y nosotros es mayor que 13800 millones de años luz (que es lo que sería si el universo fuera estático); concretamente es de unos 46.000 millones de años-luz. Por tanto el mapa en cuestión representa realmente las variaciones de temperatura en la superficie de esa imaginaria esfera gigante. Para representar una esfera sobre un papel, es frecuente imaginar que se le ha hecho una raja (de “polo Norte” a “polo Sur”) y se ha abierto y aplastado sobre el papel; es lo que se hace a menudo para realizar un mapa de la Tierra. Cuando se hace eso mismo con esa lejana esfera, lo que resulta es la famosa imagen de la Figura 3. Sigamos profundizando en su significado. Recordemos que el universo primitivo, previo a la Recombinación, estaba lleno de plasma: una sopa de partículas cargadas (núcleos positivos y electrones negativos) y fotones, en intensa interacción unos con otros. Las zonas del universo a mayor temperatura eran aquellas donde el plasma estaba más concentrado, más denso. Por

Figura 3



tanto, el famoso mapa de temperaturas de la Figura 3 representa también un *mapa de densidades* de aquel plasma primitivo en el momento de la Recombinación.

A partir de aquel acontecimiento, como sabemos, la materia se condensó en forma de átomos neutros y los fotones se desentendieron de ella. Por tanto, aunque las variaciones de densidad de la materia han seguido evolucionando (y enormemente) desde entonces, la “foto” de la radiación de fondo no ha cambiado esencialmente, y nos muestra cómo era el universo en la época de la Re-

combinación. Así que el mapa de la radiación de fondo de la Figura 3 nos da la imagen del cosmos más antigua que poseemos: cuando solo tenía 380.000 años.

Consideremos ahora lo siguiente. Esas ligeras fluctuaciones de temperatura y densidad “fotografiadas” son realmente algo bastante ordinario: ondas sonoras en el plasma primitivo. Las ondas sonoras cotidianas son de hecho perturbaciones minúsculas de densidad y presión que se propagan en el aire. Si hiciéramos un mapa de la densidad del aire en una habitación llena de ruido, veríamos fluctuaciones parecidas a las registradas en la radiación de fondo. Sigamos con esta analogía. Supongamos ahora que el aire de la habitación está lleno de un solo sonido puro (por ejemplo, una nota musical), con una longitud de onda determinada. Recordemos que la longitud de onda es la distancia entre dos crestas de una onda: en el caso del sonido, entre dos puntos con máxima densidad del aire. La figura 5 muestra la disposición de las moléculas de aire a lo largo de una misma línea en tres instantes diferentes. La línea ondulada representa la densidad en cada punto. Vemos que las zonas de máxima densidad (crestas de la línea ondulada) van alternando con las mínima densidad (valles), tanto espacialmente (a lo largo de la línea) como temporalmente (para un mismo punto, en momentos sucesivos). La onda representada es lo que se llama una onda estacionaria, como las que se forman en una cuerda de guitarra o en el interior de una flauta. Lo que caracteriza a una onda estacionaria es que no “se desplaza”, solo oscila. Este es el tipo de ondas que había en el universo primitivo.

Figura 4

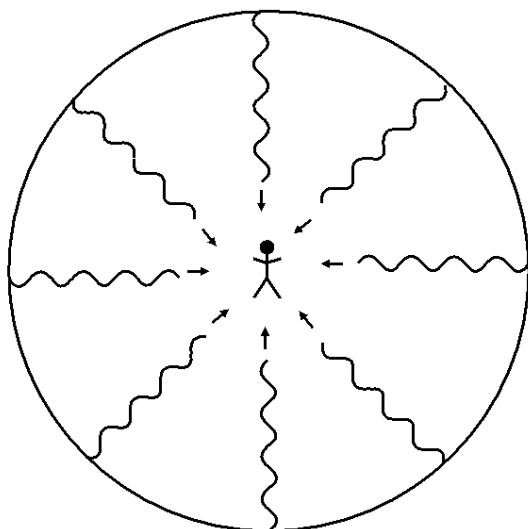
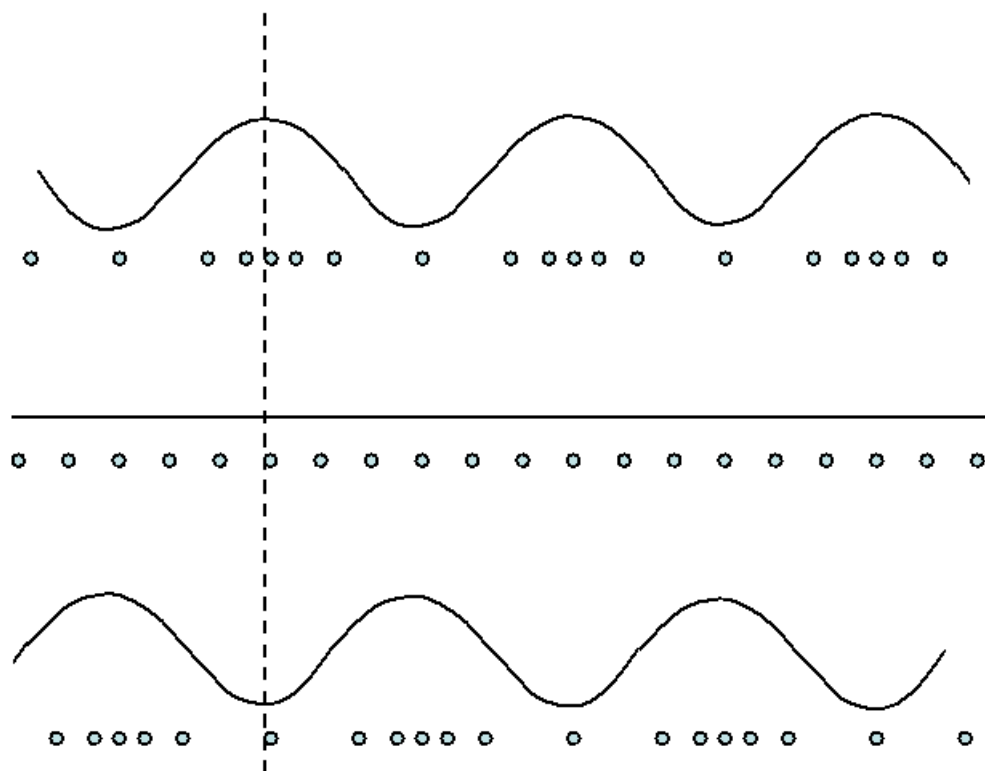


Figura 5



Notemos que el contraste (diferencia) de densidad entre dos regiones vecinas varía con el tiempo. De hecho, como se aprecia en la figura, hay un estado intermedio de la onda en el que no hay contraste en absoluto (la densidad es uniforme). Por el contrario, el máximo contraste de densidad se obtiene cuando la onda pasa por sus dos estados extremos: los que producen máximas compresiones y expansiones, como se aprecia también en la figura. Advirtamos que en ese caso los puntos con mayor diferencia de densidad entre ellos están separados por una distancia de media longitud de onda (la distancia entre una cresta y un valle).

Si el universo primitivo hubiera estado lleno de un único sonido puro, con una longitud de onda concreta, el mapa de la radiación de fondo de la figura 3 sería mucho más regular, parecido a un tablero de ajedrez de casillas rojas y azules, separadas por media longitud de onda. No es así, porque en realidad había sonidos de muy distintas longitudes de onda, superpuestos unos con otros. Y además, en el momento de la “foto” no todos estaban experimentando máxima compresión o expansión, como pronto quedará claro.

Pensemos en un instrumento musical, por ejemplo una flauta, emitiendo la nota *do*. Cuando se analiza el

sonido que produce, se comprueba que tampoco es puro. Consiste en un tono dominante o *fundamental* (correspondiente a la nota *do* pura) y muchos tonos (llamados armónicos) que acompañan al primero. Precisamente, esos armónicos son los que revisten al tono fundamental de una manera que es diferente para cada instrumento, y que le da su personalidad. Los armónicos de una flauta son distintos a los de un piano. Si no hubiera armónicos, todos los instrumentos sonarían igual (de forma parecida a un diapasón). Un especialista podría incluso plantearse el siguiente problema: a partir de un sonido musical, o sea del tono fundamental y sus armónicos, intentar *reconstruir teóricamente* la forma y material de construcción del instrumento que lo produjo. Ese especialista intentaría deducir cosas como la longitud y grosor de la flauta, si se trataba de una flauta de madera o de metal, etc. Esta tarea no es realmente tan absurda. Es en parte lo que hacen los expertos para diseñar un instrumento excelente, que imite, por ejemplo, el sonido de un violín Stradivarius. Nuestro problema es parecido. Conocemos el sonido del universo primitivo: es el que está “fotografiado” en el mapa de la radiación de fondo. Y queremos conocer las características (forma y “material de construcción”) del instrumento que lo produjo: el propio universo.

Cuando se descompone el mapa “sonoro” de la radiación de fondo en ondas puras, lo primero que se encuentra es que, al igual que en la flauta, existe una onda con más peso que las demás, y que podemos llamar *tono fundamental*. Su longitud de onda (después de haber sido amplificada unas mil veces por efecto de la expansión cósmica) ocupa en el cielo un ángulo de aproximadamente un grado. Esto se puede apreciar a simple vista en la Figura 3. Mirando la figura con atención, y recordando que representa una esfera, se percibe que, efectivamente, hay un “granulado básico”: una distancia típica del orden de un grado, en la que es más frecuente que un punto caliente pase a frío y viceversa.

Maticemos que una cosa es el tamaño real de las cosas y otra su tamaño aparente, que depende de la distancia a la que las observamos. El Sol tiene un diámetro 400 veces más grande que la Luna. Pero su tamaño aparente en el cielo es el mismo, ya que el Sol está 400 veces más lejos. En otras palabras, el ángulo visual (con vértice en nuestro ojo) que ocupa el Sol es el mismo que el que ocupa la Luna: aproximadamente medio grado; curiosamente un tamaño parecido al del granulado en el mapa de la Radiación de Fondo. Pero la esfera representada por dicho mapa está colosalmente más lejos que el Sol: a 46.000 millones de años-luz. Por ello, el tamaño “en metros” de esa longitud de onda fundamental es enorme: unos mil millones de años luz. Sin embargo, este es el tamaño que tiene ahora, después de haber sido estirada mil veces por la expansión del universo. En la época de la Recombinación (el momento de la “foto”) la longitud de onda era aproximadamente un millón de años de luz (por cierto, totalmente inaudible para nuestros oídos). ¿Por qué el tono fundamental tenía precisamente esa longitud de onda?

Para entenderlo pensemos en una pequeña región del plasma primitivo. Por efecto de las ondas sonoras, ese pedazo de plasma se contraía y se expandía como una pelota de goma o un muelle que se comprime y se estira. Ahora bien, cada onda que vibraba en el plasma primitivo tenía una longitud de onda y un periodo de oscilación distinto (a mayor longitud de onda, mayor periodo de oscilación). Entonces, aunque existieran ondas de todos los tipos, las que produjeron un mayor contraste de densidad en el instante de la Recombinación, fueron las que *en ese momento* estaban provocando una compresión o una expansión máxima en el fragmento de plasma. Vamos a ver cuáles eran.

Supongamos que *inicialmente* la región de plasma que estamos considerando tenía una densidad lige-

ramente mayor que su entorno. Entonces, lo primero que experimentó fue una compresión debida a la pura atracción gravitatoria. Este fue el comienzo de las ondas sonoras, como cuando se da una palmada y se produce un sonido. Así que, a nuestro pedazo de plasma, todas las ondas sonoras empezaron produciéndole una compresión. Después lo expandieron, y luego lo volvieron a comprimir, etc.; pero cada una lo hizo con un periodo distinto. La onda fundamental fue precisamente la que después de los primeros 380.000 años (desde el inicio del universo hasta el momento de la Recombinación) había tenido el tiempo justo de producir una primera compresión máxima del plasma, es decir media oscilación completa. Por tanto conocemos su periodo, y de ahí podemos deducir su longitud de onda¹, que resulta ser aproximadamente... un millón de años luz, en perfecto acuerdo con lo observado. Esta es pues la razón por la que el tono fundamental de la radiación de fondo tiene la longitud de onda que tiene, lo que supone una verificación sensacional de la teoría del Big Bang.

Hay que recalcar que, en realidad, no es que el universo contuviera más cantidad de esa onda fundamental que de otras. La cuestión es que en el momento de la Recombinación esa onda era “la que más se notaba” porque estaba en la fase de producir una máxima compresión. Si la “foto” del universo se hubiera podido tomar 200.000 años antes, habríamos visto otro tono fundamental.

Luego todo funciona correctamente: el tono fundamental de la Radiación de Fondo nos confirma cuál era la edad del universo en la época de la Recombinación. Pero es lógico esperar que, además del tono fundamental, existieran armónicos. Una onda de oscilación más rápida, cuyo periodo fuese la mitad del fundamental (y por tanto su longitud de onda también la mitad) habría tenido tiempo justo de realizar una oscilación completa: bajo su influencia nuestro pedazo de plasma habría tenido tiempo justo de comprimirse y luego expandirse de forma máxima. En consecuencia, esa onda también produciría un contraste máximo de densidades en el momento de la Recombinación. Y así podríamos seguir: una onda cuyo periodo y longitud de onda fueran un tercio de los de la fundamental habría tenido el tiempo justo de producir una compresión, una expansión y una nueva compresión, etc. Por ello, al analizar el mapa de la radiación de fondo uno debería esperar tonos armónicos con longitudes de onda: $1/2$, $1/3$, $1/4$, ... de la fundamental. ¡Y esto es precisamente lo que se observa!. La figura 6 representa el contenido de cada longitud de onda en el mapa

de la radiación de fondo, lo que podemos llamar su “espectro sonoro”, tal como ha sido medido por el satélite Planck en 2013 (Ade, Aganim, Armitage-Caplan *et al.*, 2014). Es el equivalente a la descomposición del sonido de una flauta en el tono fundamental y sus armónicos. En la figura 6 vemos un primer pico, correspondiente a la longitud de onda fundamental, y otros picos (los armónicos). El eje horizontal está en grados, ya que estamos midiendo las longitudes de onda por sus tamaños aparentes: los ángulos visuales que ocupan en el cielo.

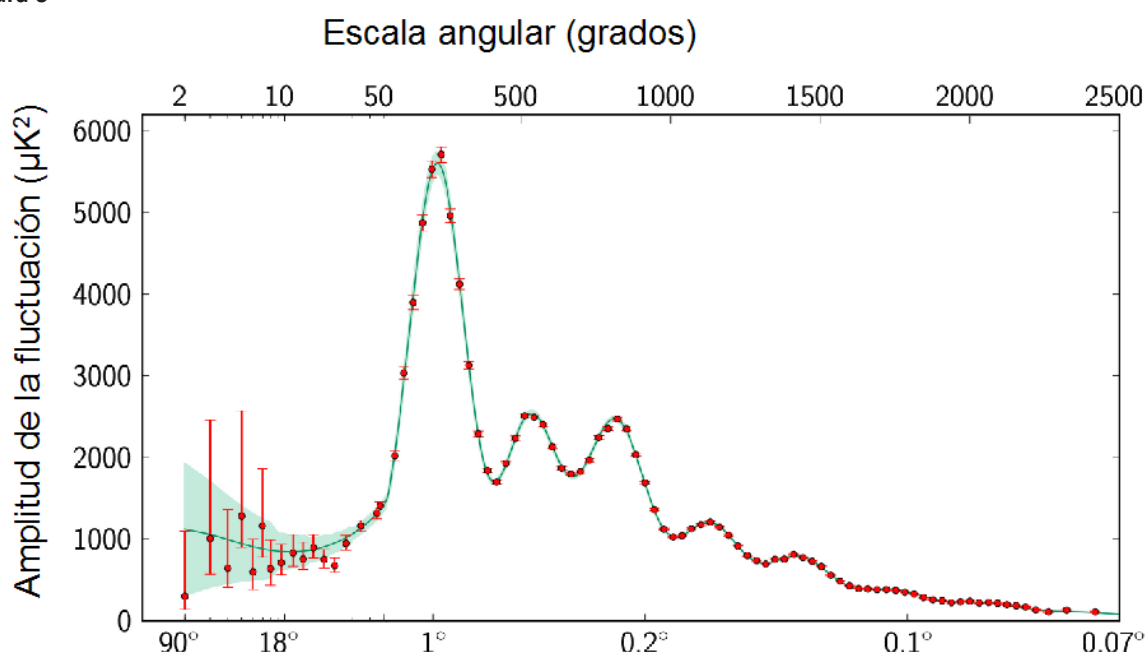
Además de confirmar las expectativas teóricas de forma impresionante, en esta figura hay una gran cantidad de información extra, como vamos a ver. El cálculo teórico de las alturas de los diversos picos encierra muchas sutilezas en las que no podemos entrar (Ade, Aganim, Armitage-Caplan *et al.*, 2014). Nos conformaremos con mencionar algunos efectos importantes que afectan a las mismas.

4. INFORMACIÓN CODIFICADA EN LAS FLUCTUACIONES DE LA RADIACIÓN DE FONDO

El primer pico del espectro sonoro de la figura 6 corresponde a la amplitud de la onda fundamental y por tanto tiene que ver con la magnitud de la compresión inicial. Como hemos dicho, esa compresión fue principalmente de tipo gravitatorio, y por tanto está relacionada (en una forma complicada y parcialmente

enmascarada por otros efectos) con la densidad de la materia. Por ello, la altura de ese primer pico contiene información directa acerca de la densidad *total* de materia del universo. Esa densidad suele expresarse en unidades de la llamada densidad crítica², sobre la que luego volveremos. Pues bien, lo que se deduce de la figura (después de un complejo análisis) es que esa densidad de materia es aproximadamente un 32% de la densidad crítica. Lo sensacional, es que esa es también la estimación de la densidad de materia realizada simplemente mirando cuál es actualmente la densidad de materia total. Más exactamente hay que decir que, la observación de galaxias, cúmulos de galaxias y el gas intergaláctico entre ellas indica que la densidad de materia ordinaria del universo es aproximadamente un 5% de la densidad crítica. A esto hay que sumarle la contribución de la llamada *materia oscura* del universo: una misteriosa materia que solo ha podido ser detectada por sus efectos gravitatorios sobre la materia ordinaria. La naturaleza de esta materia oscura es un enigma, prácticamente lo único que sabemos de ella es que no puede tratarse de materia ordinaria (en cuyo caso ya la habríamos detectado de una u otra forma). La materia oscura envuelve a las galaxias como un halo difuso, y se extiende más allá de los confines de las mismas, como gigantescos girones de niebla. Las pruebas de su presencia son abrumadoras, aunque aún no sepamos su origen. En cualquier caso su contribución a la densidad total del universo, me-

Figura 6



didada a partir de las observaciones de su influencia gravitatoria, es aproximadamente un 27% de la densidad crítica, que sumado al 5% anterior nos da el 32% deducido, de forma totalmente independiente, a partir de las fluctuaciones de la radiación de fondo, figura 6. Esta coincidencia es un éxito sensacional de la teoría del Big Bang, y de hecho nos da la medida más precisa de que disponemos acerca de la cantidad total de materia oscura en el universo.

Vayamos ahora con el segundo pico. Recordemos que corresponde a una onda que en el momento de la Recombinación producía máxima expansión en nuestro trozo de plasma. Por tanto, su altura tiene que ver con la magnitud de esa expansión. Pensemos por un momento: ¿qué fuerza produce esa expansión del plasma? Simplemente la presión del mismo. Al igual que la presión del aire en las ondas sonoras ordinarias, la presión del plasma tiende siempre a restablecer el equilibrio de densidad y temperatura. Por ello, después de una compresión, la presión produce una expansión, como un muelle que tras ser comprimido se expande. Sin embargo, ahora la gravedad juega a la contra: a la materia del plasma le cuesta más expandirse que contraerse, porque la fuerza gravitatoria tiende siempre a comprimirla. En un imaginario mundo sin gravedad, las compresiones y las expansiones serían igualmente importantes. Pero en el mundo real con gravedad la expansión de nuestro pedazo de plasma será menos acentuada de lo que fue su compresión. Esto explica por qué la altura del segundo pico del espectro sonoro es más baja que la del primero. Además, pensemos en lo siguiente. En un plasma, la presión es debida sobre todo a los fotones que están en él, y que están interaccionando con las partículas cargadas. Esto significa que la materia oscura *no siente* esa presión, ya que no interacciona con los fotones. Por tanto, *solo la materia ordinaria* (la que forma el plasma propiamente dicho) *se expande*. En consecuencia, la altura del segundo pico está relacionada con la cantidad de materia ordinaria del universo. Y lo que se deduce de esa altura es que la materia ordinaria es aproximadamente un 5% de la densidad crítica. ¡Justo lo que se preveía! Además, deducimos que, efectivamente, la materia oscura no puede ser materia ordinaria, ni estar compuesta por partículas con carga eléctrica. Si fuera así, habría formado parte del plasma inicial, y la altura del segundo pico sería distinta. La materia oscura ha de ser necesariamente “otra cosa”.

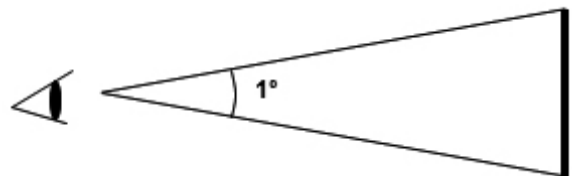
Lo que hemos dicho para el segundo pico, se puede aplicar a todos los picos del espectro sonoro que ocu-

pan posiciones pares -asociados a expansiones máximas del plasma. Como se observa en la figura, tienden a ser más bajos que los picos en posiciones impares -asociados a compresiones máximas. También hay un efecto disipativo de las ondas sonoras, que hace que los picos sean cada vez más bajos.

Todo esto suponen éxitos extraordinarios que se han obtenido en los últimos años analizando el mapa de la radiación de fondo. Los astrofísicos y cosmólogos han analizado y siguen analizando este mapa como lo habría hecho Sherlock Holmes en busca de pistas.

De hecho aún se puede extraer más información. Hemos dicho que la longitud de onda del tono fundamental subtiende en el cielo un ángulo de un grado aproximadamente. Esto es lo que se deduce directamente de la posición (no altura) del primer pico en la figura 6, y está simbolizado en la figura 7:

Figura 7



Ahora bien, al dibujar este triángulo estamos dando por sentado que el universo tiene geometría plana. Pero hemos dicho que según la Teoría de la Relatividad, el espacio y el tiempo pueden curvarse. Consideremos esta cuestión: el universo como un todo, ¿está curvado *globalmente*?

Según la ecuación principal de la Relatividad General de Einstein, la curvatura global del universo depende de la *densidad* de materia y energía que contenga. Llamemos a esa densidad con la letra griega ρ . Si ρ es grande, el espacio se curva (como cerca de una gran masa) y globalmente el espacio está cerrado, como la superficie bidimensional de una esfera, pero en tres dimensiones. Nuevamente cuesta imaginárselo (es imposible), pero matemáticamente no hay problema en describirlo. En ese caso el universo sería finito, pero no tendría límites; igual que la superficie de la esfera. Por el contrario, si ρ es pequeña, el espacio también está curvado pero con curvatura *negativa* (la de la esfera era positiva). Un equivalente en dos dimensiones de curvatura negativa es la superficie de una silla de montar para caballos. Si este es el caso

de nuestro universo, entonces el espacio se extiende infinitamente (igual que podríamos prolongar de forma indefinida la superficie de una silla de montar). Finalmente, hay un caso intermedio: si ρ tiene un valor concreto, precisamente el denominado *densidad crítica* (ρ_c), para el cual el espacio es plano e infinito. El espacio plano es como uno se imagina normalmente el espacio. En la figura 8 están representados, en dos dimensiones, estos tres tipos de espacio. Habitualmente se denominan espacio (o universo) *cerrado*, *abierto* y *plano*. Hemos trazado un triángulo en cada tipo de superficie. Naturalmente, en el caso plano los ángulos del triángulo suman 180° , como estamos acostumbrados. Sin embargo en el universo cerrado la suma es mayor de 180° , y en el abierto es menor.

Por tanto, en un universo cerrado o abierto la figura 7 tendría el aspecto de la figura 9.

El ángulo visual aparente que ocuparía la longitud de onda fundamental en estos casos sería, respectivamente, mayor o menor que en el caso plano. Pero resulta que el ángulo medido concuerda perfectamente con el caso plano. De ahí deducimos que nuestro espacio es necesariamente muy plano y por tanto muy grande (quizá infinito, aunque esto no es seguro).

Si el universo fuera cerrado o abierto la posición del primer pico hubiera sido distinta (más hacia la izquierda o hacia la derecha, respectivamente).

Por otro lado, si el universo es muy plano, la densidad total de materia y energía ha de ser muy próxima a la crítica, como acabamos de decir. Sin embargo, sabemos que la suma de materia ordinaria y oscura representa solo el 32% de la densidad crítica. Por ello, hace falta algún componente extra en el universo, que no sea ni materia oscura ni ordinaria, sino algo diferente. Y ese “algo” es la llamada energía oscura, un descubrimiento extraordinario y relativamente reciente. La energía oscura es aún más extraña que la materia oscura. Consiste en una especie de energía asociada al propio espacio, llenando de forma *uniforme* todo el universo, incluso los espacios aparentemente vacíos. Podemos imaginarla como un campo (semejante al campo eléctrico pero con características distintas) que llena el cosmos de manera homogénea. En cierto modo, es como si el propio espacio tuviera una pequeñísima densidad de energía o, equivalentemente, de masa (recordemos, $E=mc^2$). Las primeras indicaciones de la existencia de la EO se obtuvieron en 1998, cuando, contra todo pronóstico, se observó que el universo estaba acelerando su ritmo de expansión, un efecto que no puede causar la materia (ni ordinaria ni oscura). Como vemos, el análisis de la radiación de fondo también nos permite inferir la existencia de esta energía oscura, como el componente que falta para completar el 100% de la densidad crítica, que es la que parece

Figura 8

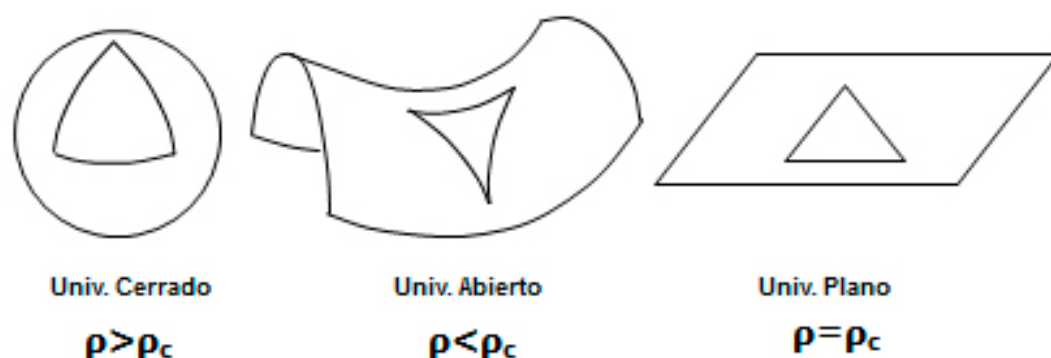
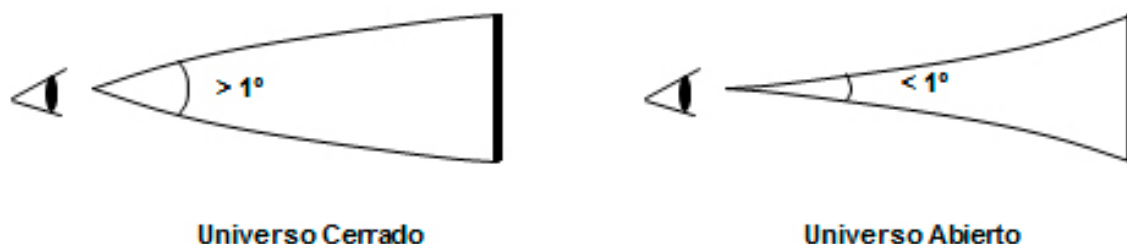


Figura 9



tener el universo. La energía oscura ha de representar por tanto aproximadamente un 68% de la densidad crítica, que es precisamente lo que se deduce del estudio del ritmo de expansión del universo. Notemos que la energía oscura es, en consecuencia, el ingrediente más abundante (y misterioso) del universo. Y hay que reconocer que la radiación de fondo nos da pocas pistas sobre su naturaleza.

Como hemos visto, la cantidad de información codificada en la Radiación de Fondo es sorprendentemente abundante. De hecho, hay información adicional que no hemos discutido (por ejemplo, la relacionada con la polarización de esa radiación). Actualmente, la comunidad científica está realizando un gran esfuerzo para descifrar toda la información contenida en este auténtico tesoro del pasado remoto, por lo que podemos esperar noticias interesantes en los próximos años.

NOTAS

- 1 Como la onda había tenido tiempo de realizar media oscilación en 380.000 años, su periodo era el doble de este intervalo. Por otro lado, su longitud de onda se puede deducir a partir de su periodo (conocido) y la velocidad del sonido (también conocida en un plasma como el primitivo).
- 2 La densidad crítica es muy pequeña $\sim 10^{-26}$ kg/m³. Un volumen como el de la Tierra, lleno de materia con la densidad crítica tendría una masa de 10 miligramos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ade, P. A. R., Aganim, N., Alves, M. I. R., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M. *et al.* (2014). Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. *Astronomy and Astrophysics*, 571, A1. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321529>
- Ade, P. A. R., Aganim, N., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M., Atrio-Barandela, F. *et al.* (2014). Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astronomy and Astrophysics*, 571, A16. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321591>
- Einstein, A. (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 2 Halbband, XLVIII-XLIX, pp. 844–847.
- Friedman, A. (1922). Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik* 10, 1, pp. 377–386. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01332580>
- Lemaître, G. (1927). A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 91, pp. 483-490. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>
- Penzias, A. A. y Wilson, R. W. (1965). A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophysical Journal*, 142, 1, pp. 419-421. <http://dx.doi.org/10.1086/148307>
- Smoot, G. F., Bennett, C. L., Kogut, A., Wright, E. L., Aymon, J., Boggess, N. W., Cheng, E. S. *et al.* (1992). Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophysical Journal*, 396, 1, pp. L1-L5. <http://dx.doi.org/10.1086/186504>